

# AVALIAÇÃO BASEADA EM SENSORIAMENTO REMOTO DOS FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO SOBRE OS ECOSISTEMAS TERRESTRES NO NORDESTE DO BRASIL

Michele Laurentino de Oliveira<sup>1</sup>, Carlos Antonio Costa dos Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, michele.laurentino@gmail.com; <sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande, carlostorm@gmail.com

## RESUMO

A avaliação espaço-temporal dos fluxos de água e carbono no Nordeste do Brasil (NEB) permite uma melhor compreensão desses fluxos em áreas com diferentes fisionomias vegetais. A degradação do solo é um problema crescente, particularmente em áreas suscetíveis do bioma Caatinga. A crescente pressão humana em terras naturais da Caatinga tornou-se uma região particularmente vulnerável à desertificação. Neste estudo, estimativas do MOD16A2 (ET) e MOD17A2H (GPP) foram validadas em duas áreas contrastantes, Caatinga densa (DC) e Caatinga esparsa (SC), usando dados de *Eddy Covariance* e, em seguida, investigou seu comportamento ao longo de 21 anos (2000-2020) no NEB. Estimativas explicaram 60% das variações em ET e GPP na Caatinga. Em comparação com os demais biomas do NEB, menores médias da ET e GPP foram detectados na Caatinga, semelhantes a valores observados na SC. Em áreas densas, semelhantes a DC, a Caatinga se comportou próxima dos demais biomas presentes no NEB.

**Palavras-chave** — Caatinga, desertificação, MOD16A2, MOD17A2H, *Eddy Covariance*.

## ABSTRACT

*The spatio-temporal assessment of water and carbon fluxes in Brazil's Northeast (NEB) allows a better understanding of these fluxes in areas with different vegetation physiognomies. Land degradation is a growing problem, particularly in susceptible areas of the Caatinga biome. Growing human pressure on natural lands in the Caatinga has made it a region particularly vulnerable to desertification. In this study, estimates of MOD16A2 (ET) and MOD17A2H (GPP) were validated in two contrasting areas, Caatinga densa (DC) and Caatinga sparsa (SC), using data from Eddy Covariance and then investigated their behavior over 21 years (2000-2020) in the NEB. Estimates explained 60% of the variations in ET and GPP in the Caatinga. Compared to the other NEB biomes, lower ET and GPP averages were detected in the Caatinga, similar to values observed in SC. In dense areas, similar to DC, the Caatinga behaved close to the other biomes present in the NEB.*

**Key words** — Caatinga, desertification, MOD16A2, MOD17A2H, *Eddy Covariance*.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo dos fluxos de água e carbono sobre ecossistemas específicos permite aos pesquisadores buscar entender os diferentes padrões da vegetação, como distribuição de espécies ou efeitos da degradação induzida pelo homem [1]. Além disso, é importante para desenvolver melhor modelos e previsões futuras [2].

Identificar fontes e sumidouros de carbono terrestre é fundamental para entender o sistema terrestre, bem como a mitigação e adaptação a variações climáticas resultante, por exemplo, das emissões de gases de efeito estufa [3]. Uma maneira de avaliar os fluxos de carbono em áreas com vegetação é analisar a produção primária bruta (GPP). GPP é uma componente do ciclo global de carbono formado durante o processo de fotossíntese devido à quantidade de carbono assimilado pela vegetação [4]. GPP está fortemente ligada a ET [5], e estimativas precisas dessas variáveis nos ajudam a entender os padrões do ciclo da água e do carbono em muitos ecossistemas terrestres [6].

A técnica de correlações turbulentas, também conhecida como *Eddy Covariance* (EC), é amplamente utilizada para medir esses fluxos. Apesar da alta precisão desses fluxos estimados, a técnica é inviável para análise em grandes áreas devido aos custos relacionados à instalação, operação e manutenção. Como resultado, apenas algumas áreas têm uma ampla distribuição espacial de torres para obter esses fluxos em escalas maiores. Assim, dados de sensoriamento remoto orbital (SR) tornaram-se cada vez mais populares nos últimos anos para superar a escassez de dados de campo [7, 8]. A adoção de modelos baseados em SR para estimar ET e GPP em grandes áreas está se tornando mais comum, e os dados obtidos das torres de fluxo servem para validar o desempenho de diferentes modelos físicos e empíricos [9, 7, 10].

Um dos conjuntos de dados de SR mais comumente usados são os do *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), MODIS fornece dados ET (MOD16A2) e GPP (MOD17A2H) em composições de 8 dias com resolução espacial de 500 m [11,12]. Embora os produtos MODIS tenham sido amplamente validados usando torres EC distribuídas na América e Europa [13, 14, 9], eles não foram amplamente validados para o bioma Caatinga na região Nordeste do Brasil (NEB).

Neste estudo, hipotetizamos que a validação dos produtos MODIS ET e GPP em regiões estratégicas do bioma Caatinga ajudará a entender o comportamento do modelo em diferentes

densidades de cobertura vegetal e, avaliações em áreas onde ocorreram processos de degradação da terra. Além disso, com a validação desses modelos, será possível analisar uma longa série histórica (por exemplo, de 2000 até o presente), permitindo análises espaço-temporais de fluxos de água e carbono. Com base nas considerações acima, os objetivos deste estudo são (i) validar os produtos MOD16A2 e MOD17A2H para duas áreas contrastantes da Caatinga e (ii) comparar as magnitudes e a sazonalidade do GPP e ET ao longo de 21 anos (2000 – 2020) entre a região do NEB e os quatro principais biomas brasileiros (Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O estudo está dividido em duas partes: (i) validação dos produtos MODIS ET E MODIS GPP a partir de estimativas baseadas em medições de EC no bioma Caatinga; e (ii) comparações espaço-temporais dos fluxos de água e carbono no NEB, incluindo os biomas Mata Atlântica, Amazônia, Cerrado e Caatinga (Figura 1B).

A validação dos produtos MODIS foi realizada em dois tipos de cobertura do solo com diferentes densidades de vegetação no bioma Caatinga, onde estão instaladas as torres EC [5]. Essas áreas estão localizadas no município de Campina Grande, Estado da Paraíba (Figura 1C). A primeira área é um fragmento de Caatinga em recuperação (vegetação densa, doravante denominada “DC”). A segunda área (vegetação esparsa, doravante denominada “SC”) é considerada degradada, com árvores atingindo aproximadamente 2 m de altura e apresentando uma alta porcentagem de solo nu e afloramentos rochosos [5]. A Figura 1C mostra as duas áreas (DC e SC).

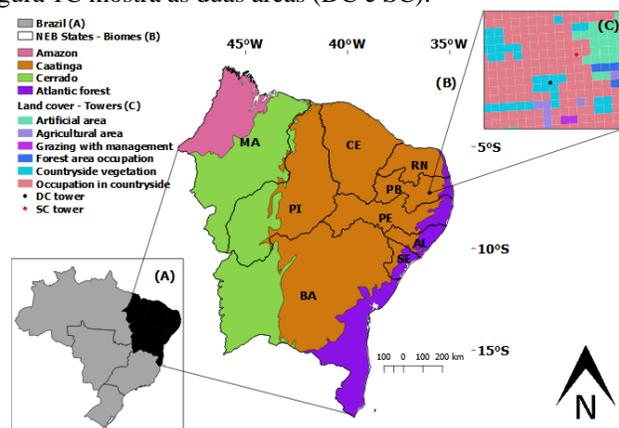


Figura 1. Região Nordeste do Brasil (NEB) (A), biomas do NEB (B) e cobertura do solo das áreas DC e SC (C).

### 2.2. Dados

O período utilizado para validar os dados de SR foi de março de 2013 a dezembro de 2016 para ET e GPP. O período

de estudo foi selecionado considerando a disponibilidade de dados simultâneos em ambas as torres.

Foram utilizados os produtos MODIS ET (MOD16A2) e MODIS GPP (MOD17A2H), versão 6 [11, 12]. Os produtos são acessíveis em composição de 8 dias com resolução espacial de 500 m. As estimativas MOD16A2 e MOD17A2H foram extraídas dentro de um buffer de 1 km ao redor das torres para cada área, o que corresponde a uma janela de  $5 \times 5$  pixels. A média dos pixels extraídos foi calculada e a escala fatorial foi corrigida de acordo com o produto obtido, conforme descrito no guia do usuário MODIS [11]. Para validar esses produtos, os compósitos de 8 dias foram transformados em diários conforme descrito no guia do usuário MOD17. Para a análise espaço-temporal, a composição anual do produto foi utilizada para observar a sazonalidade dos fluxos no NEB. A série temporal utilizada foi de 21 anos para GPP e 20 anos para ET devido à disponibilidade dos produtos MODIS.

### 2.3. Análise de dados

Quatro índices foram utilizados para validar a precisão das estimativas dos produtos MODIS: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro relativo médio (MARE) e BIAS.

Para as análises espaço-temporais no NEB, foram calculadas as composições anuais da ET e GPP através da do Google Earth Engine (GEE) (disponível em <https://code.earthengine.google.com/>).

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Validação dos produtos MOD16A2 e MOD17A2H para áreas do bioma Caatinga

No geral, os valores de  $R^2$  ficaram acima de 0,6 (Fig. 2), significando que os produtos MODIS explicaram aproximadamente 60% das variações de ET e GPP, exceto para GPP na área SC, que explicou 53% das variações. Os produtos MODIS apresentaram maior precisão na área DC.

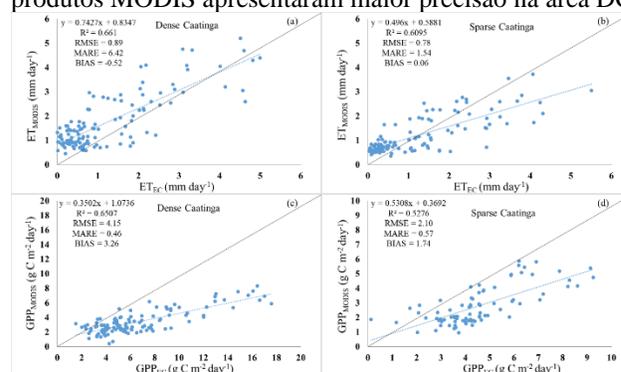
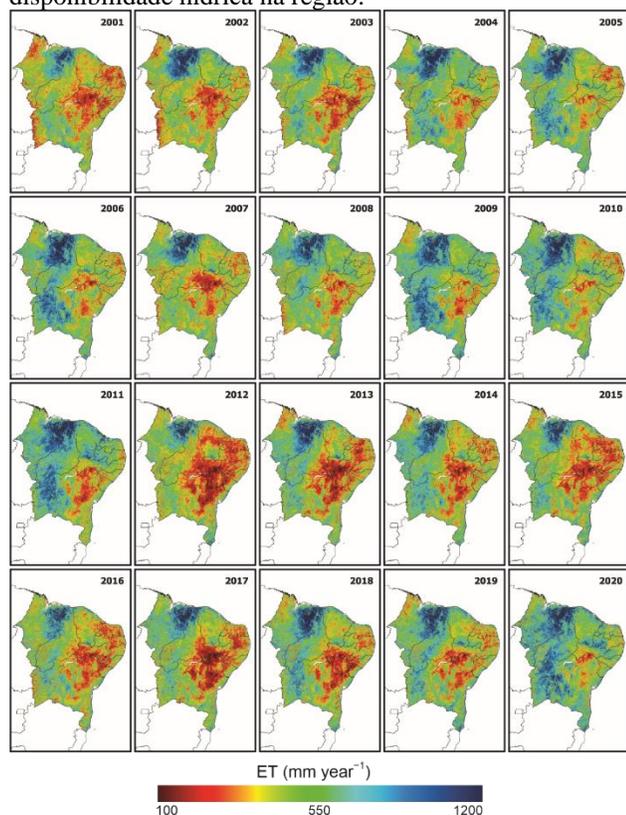


Figura 2. Comparações de dados observados diários (EC) com produtos MODIS: (a) MODIS ET para a área DC; (b) MODIS ET para a área SC; (c) MODIS GPP para a área DC; e (d) MODIS GPP para a área SC.

### 3.2. Análises espaço-temporais da ET e GPP para o NEB

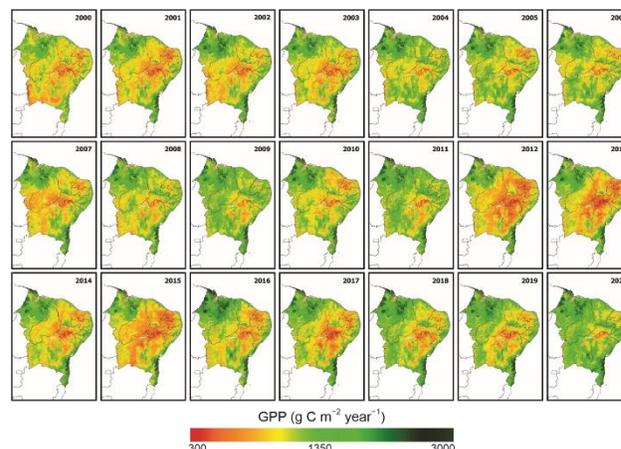
Para entender melhor os fluxos de água e carbono ao longo de diferentes coberturas da terra, expandimos nossa análise para o nível regional. Utilizando a plataforma GEE foi possível gerar distribuições espaciais da ET e GPP anual através dos produtos MOD16A2 e MOD17A2H, respectivamente.

A distribuição espacial da ET anual obtida a partir do produto MOD16A2 para os anos estudados (2001-2020) no NEB é mostrada na Fig. 3. A ET anual variou de 100 a 1200 mm ano<sup>-1</sup>, com maiores valores da ET na parte norte da região, onde estão localizados os estados do Maranhão e Piauí. Esses altos valores da ET são vistos no bioma Cerrado, que abrange o sul do estado do Maranhão e o oeste do estado do Piauí e Bahia, atingindo valores próximos a 1200 mm ano<sup>-1</sup>. A parte central do NEB, que abrange o bioma Caatinga, teve valores baixos da ET, atingindo valores próximos a 100 mm ano<sup>-1</sup>. Esses valores podem ser explicados pela disponibilidade hídrica na região.



**Figura 3. Mapas de evapotranspiração anual (ET) derivados do produto MOD16A2 (2001–2020) para o NEB.**

Os mapas cumulativos anuais da GPP são mostrados na Fig. 4. Valores de GPP variou de 300 a 3000 g C m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>, com a parte central do NEB mostrando valores mínimos de GPP, com mais evidência para o norte da Bahia, que apresenta valores baixos de GPP em todo o período estudado.



**Figura 4. Mapas de Produção Primária Bruta anual (GPP) derivados do produto MOD17A2H (2000–2020) para o NEB.**

### 4. DISCUSSÃO

Embora a MODIS ET tenha superestimado os dados observados nas duas áreas locais (Fig. 2a e b), a superestimação do MOD16 também foi encontrada em outros estudos, incluindo [15, 7, 16]. O comportamento da ET nestas áreas pode estar associado ao erro de classificação do MOD12Q1, o que resulta em estimativas de LAI e, consequentemente, ET [15]. Além disso, a maior parte da vegetação da Caatinga no NEB é classificada erroneamente no MCD12Q1 como vegetação campestre, levando à seleção errada da Tabela de Pesquisa de Propriedades do Bioma (BPLUT). O produto MODIS GPP subestimaram os dados observados para as duas áreas de estudo. É importante observar que os produtos MODIS tiveram melhor desempenho na área preservada (DC). Estudos de [17, 7] também mostrou melhor desempenho do produto MODIS em áreas com cobertura vegetal densa. Como resultado, hipotizamos que está relacionado ao fato de que o algoritmo MODIS LAI tem maior precisão sobre vegetação densa e em áreas com menor influência do solo, o que precisa ser mais abordado.

A partir da análise temporal da ET (Fig. 3), é possível observar o efeito da seca em ET. Em 2012, ano em que se iniciou uma das mais intensas secas na região [18], a área vermelha (baixa ET) aumentou consideravelmente, durando até 2019, período em que essas regiões foram afetadas por chuvas abaixo da média histórica. Também é possível observar uma variação interanual mais significativa da ET no bioma Cerrado. O uso agrícola de culturas transitórias na região, como soja, milho, arroz e outras culturas, podem explicar essas diferenças [19].

Os valores máximos de GPP (Fig. 4) foram localizados na região que abrange o bioma Amazônia (norte do Maranhão) e na região que abrange o bioma Mata Atlântica (sul da Bahia), são regiões que apresentam densidades consideráveis de cobertura vegetal, com árvores atingindo até 40 m. O bioma Cerrado apresentou valores de GPP de maior magnitude na porção norte do estado do Maranhão. Esses

valores estão de acordo com os apresentados por [20], onde foram identificados altos valores de GPP em florestas tropicais com maior temperatura média anual e precipitação, enquanto baixos valores de GPP foram observados em regiões semiáridas com limitações hídricas na região.

O bioma Caatinga foi o que mais sofreu com a seca em 2012, apresentando valores de ET muito baixos em relação aos anos anteriores, e é possível ver que esses valores permaneceram abaixo de 500 mm ano<sup>-1</sup> até 2017. Os demais biomas apresentaram valores mínimos de ET em 2001, exceto para o bioma Caatinga. No entanto, 2011 e 2020 tiveram a maior taxa de ET; são anos que ocorreram chuvas significativas na região. Assim, os altos valores de ET na região estão ligados à disponibilidade hídrica. Uma avaliação mais detalhada dos resultados pode ser obtida em [21].

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo, focamos na validação dos produtos MODIS ET e GPP em regiões estratégicas do bioma Caatinga, a fim de ajudar a compreender esses fluxos em diferentes densidades de cobertura vegetal (Caatinga densa e Caatinga esparsa degradada). Além disso, analisamos os padrões espaço-temporais desses fluxos em comparação com outros biomas presentes no NEB. Nossas descobertas mostram que os produtos MODIS podem prever com precisão taxas mensais e anuais de GPP e ET em escala regional para o bioma Caatinga.

Apesar das limitações das estimativas dos produtos MODIS relacionadas à parametrização da cobertura da terra, essas estimativas podem ser super ou subestimadas em alguns pontos. No entanto, elas podem representar bem a dinâmica desses fluxos para diferentes tipos de cobertura do solo e densidades de vegetação na Caatinga.

## 6. REFERÊNCIAS

[1] A. Ito, M. Inatomi. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles, *J. Hydrometeorol*, v. 13: pp. 681–694, 2012.

[2] K.-M. Kohonen, R. Dewar, G. Tramontana, A. Mauranen, P. Kolari. Intercomparison of methods to estimate GPP based on CO<sub>2</sub> and COS flux measurements, *Biogosciences*, v.19: pp. 4067–4088, 2022.

[3] T. L. Smallman, D. T. Milodowski, E. S. Neto, G. Koren, J. Ometto, M. Williams. 2021. Parameter uncertainty dominates C-cycle forecast errors over most of Brazil for the 21st century, *Earth Syst. Dyn.*, v. 12: pp. 1191–1237, 2021.

[4] X. Huang, J. Xiao, M. Ma. 2019. Evaluating the performance of satellite-derived vegetation indices for estimating gross primary productivity using FLUXNET observations across the globe, *Remote Sens*, v. 11(15), 2019.

[5] M. L. Oliveira, C. A. C. dos Santos, G. de Oliveira, A. M. Perez-Marin, C. A. G. Santos. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers, *Sci. Total Environ*, v. 792, 2021.

[6] X. Li, J. Xiao, B. He. Higher absorbed solar radiation partly offset the negative effects of water stress on the photosynthesis of Amazon forests during the 2015 drought, *Environ. Res. Lett.*, v. 13, 2018.

[7] G. de Oliveira, N. A. Brunseel, E. C. Moraes, Y. E. Shimabukuro. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in Amazonia, *Int. J. Remote Sens*, vv. 38(19): pp. 5291–5309, 2017.

[8] L. Laipelt, R. H. B. Kayser, A. S. Fleischmann, A. Ruhoff. ISPRS J. Photogramm, *Remote Sens*, vv. 178: pp. 81–96, 2021.

[9] X. Wang, M. Ma, X. Li, Y. Song, J. Tan, G. Huang, Z. Zhang. Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in northern China, *Int. J. Remote Sens*, v. 34(2): pp. 587–599, 2013.

[10] X. Huang, J. Xiao, X. Wang, M. Ma. Improving the global MODIS GPP model by optimizing parameters with FLUXNET data, *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 300, 2021.

[11] S. Running, Q. Mu, M. Zhao. MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015.

[12] S. Running, Q. Mu, M. Zhao. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017.

[13] F. H. Yang, K. Lchii, M. A. White, H. Hashimoto, A. R. Michaelis, P. Votava. Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AMERIFLUX data through support vector machine approach, *Remote Sens. Environ*, v. 110: pp. 109–122, 2007.

[14] Q. Mu, M. Zhao, S. W. Running. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm, *Remote Sens. Environ*, v. 115 (8): pp. 1781–1800, 2011.

[15] A. L. Ruhoff, A. R. Paz, L. E. O. C. Aragao, Q. Mu, Y. Malhi. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using Eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande Basin, *Hydrol. Sci. J.*, v. 58 (8): pp. 1658–1676, 2013.

[16] Y. Li, L. Li, J. Dong, J. Bai. Assessing MODIS carbon and water fluxes in grasslands and shrublands in semiarid regions using eddy covariance tower data, *Int. J. Remote Sens*, v. 42 (2): pp. 595–616, 2021.

[17] A. L. Ruhoff. Remote Sensing Applied to Estimation of Evapotranspiration in Tropical Biomes. Federal University of Rio Grande do Sul PhD diss, 2011.

[18] J. C. Dantas, R. M. da Silva, C. A. G., Santos. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the upper Paraíba River basin, *Environ. Monit. Assess*, v. 192, 2020.

[19] C. A. S. Junior, G. M. Costa, F. S. Rossi, J. C. E. Vale, R. B. Lima. Remote sensing for updating the boundaries between the Brazilian Cerrado-Amaozonia biomes, *Environ. Sci. Policy*, v. 101: pp. 383–392, 2019.

[20] S. Wang, Y. Zhang, W. Ju, B. Qiu, Z. Zhang. Tracking the seasonal and inter-annual variations of global gross primary production during last four decades using satellite nearinfrared reflectance data. *Sci. Total Environ*, v. 755, 2021.

[21] M. L. Oliveira, C.A.C. Santos, G. Oliveira, M.T. Silva, B.B. Silva. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil, *Science of the Total Environment*, 835, 2022.